

文章编号: 1000-7032(2018)10-1417-08

## C-V法研究温度对 GaN 基蓝光二极管 pn 结的影响

王春安<sup>1,2</sup>, 符斯列<sup>3\*</sup>, 刘 柳<sup>1</sup>, 丁罗城<sup>3</sup>, 李俊贤<sup>3</sup>, 鲍佳怡<sup>3</sup>

(1. 华南师范大学 华南先进光电子研究院, 广东 广州 510006;

2. 广东技术师范学院 电子与信息工程学院, 广东 广州 510665; 3. 华南师范大学 物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 采用 C-V 法, 根据  $C^{-2}$ -V 曲线和  $C^{-3}$ -V 曲线, 并结合 C-V 幂律指数  $k$ , 分析了  $T = 25 \sim -195$  °C 温度范围内, 温度变化对 GaN 基蓝光发光二极管 pn 结类型的影响。实验结果表明: 当  $T$  为 25 °C 和 -50 °C 时,  $C^{-2}$ -V 呈明显的线性关系, 同时幂律指数  $k$  为 0.5, 说明该温度范围内的 pn 结类型为严格的突变结; 而温度降低至 -100 °C 时,  $k$  值变为 0.45, 说明 pn 结类型开始发生变化; 当温度继续降低至 -150 °C 和 -195 °C 时, 幂律指数  $k$  分别为 0.30 和 0.28, 说明 pn 结类型已经发生了变化, 变为非突变非缓变结。造成这一现象的原因是低温导致的载流子冻析效应, 以及晶体的缺陷和界面态形成的局域空间电荷区在低温环境下, 影响了 pn 结原来的空间电荷分布, 并改变了 pn 结类型。

**关键词:** GaN 基蓝光二极管; pn 结特性; 电容-电压法; 幂律关系

中图分类号: TN312<sup>+</sup>.8; TN383<sup>+</sup>.1 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183910.1417

## Effect of Temperature on The pn Structure of GaN-based LED by C-V Measurement

WANG Chun-an<sup>1,2</sup>, FU Si-lie<sup>3\*</sup>, LIU Liu<sup>1</sup>, DING Luo-cheng<sup>3</sup>, LI Jun-xian<sup>3</sup>, BAO Jia-yi<sup>3</sup>

(1. South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;

2. School of Electronic and Information, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China;

3. School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

\* Corresponding Author, E-mail: fust@snu.edu.cn

**Abstract:** Capacitance-voltage (C-V) measurement is a useful method for studying of pn junction. In this paper, the C-V measurement was applied to analyze the influence of temperature on the type of pn junction of GaN-base LED in a temperature range from 25 °C to -195 °C according to  $C^{-2}$ -V curve,  $C^{-3}$ -V curve and power law index  $k$ . The experimental results showed that the change of temperature will have an effect on the structure of junction. When the temperatures are 25 °C and -50 °C, respectively, there was a significant linear relationship for  $C^{-2}$ -V, and the index  $k$  was 0.5, which indicating an abrupt junction in a temperature range from 25 °C to -50 °C. When the temperature was cooled down to  $T = -100$  °C, the structural type of pn junction began to change and the index  $k$  was 0.45. When the temperature continued to decrease to  $T = -150$  °C and -195 °C, the index  $k$  became 0.30 and 0.28, corresponding to a non-abrupt and non-linear junction. The possible explanations of such phenomenon were low-temperature carrier freeze effect, and the localized space charge region produced by crystal defects and interface states. The enhancement of localized space charge region finally affected the structure of pn junction in low temperature environment.

收稿日期: 2018-01-29; 修订日期: 2018-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(10575039); 广东省自然科学基金(S2013010012548)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (10575039); Natural Science Foundation of Guangdong Province (S2013010012548)

**Key words:** GaN-based blue light emitting diodes; pn junction;  $C$ - $V$  measurement; power-law

## 1 引 言

随着 III-V 族化合物 GaN 基蓝光发光二极管 (LED) 的广泛使用, 相应的二极管 pn 结的结构特性研究也随之展开<sup>[1-3]</sup>。其中, 电容-电压 ( $C$ - $V$ ) 测量法作为一种简单、快速、无损伤的 pn 结特性诊断方法<sup>[4]</sup>, 不仅可以应用于电子二极管和肖特基结, 还可以应用于发光二极管的 pn 结特性研究。通过给 pn 结施加反向偏置电压  $V$ , 测量对应的 pn 结电容  $C$ , 然后根据  $C$ - $V$  曲线以及相应的  $C^{-2}$ - $V$  曲线和  $C^{-3}$ - $V$  曲线, 就可以判断二极管的 pn 结类型, 计算 pn 结接触电势差  $V_D$ 、获得 pn 结的杂质浓度分布信息<sup>[5]</sup> 以及测量半导体的禁带宽度<sup>[6]</sup>。目前  $C$ - $V$  法在 GaN 基器件的特性诊断研究主要有: 计算 GaN 基肖特基二极管的接触势垒高度<sup>[7-8]</sup>; 分析 GaN 与合金、非合金的欧姆接触及肖特基接触的接触机制<sup>[9-11]</sup>; 分析 AlGaIn/GaN 异质结中界面态对  $C$ - $V$  特性的影响<sup>[12,13]</sup>; 利用温变电容特性测量 GaN 白光 LED 结温<sup>[14]</sup> 等。但是, 有关变温、特别是低温对 GaN 基蓝光发光二极管 pn 结特性影响的研究则较少。

GaN 基蓝光 LED 的 pn 结一般由 n-GaN: Si 和 p-GaN: Mg 构成, 或者为了提高光电转换效率, 在这两层之间插入一层薄的有源层。这个有源层可以是单独的 InGaIn 层或 InGaIn/GaN 多量子阱结构<sup>[15]</sup>。未有意掺杂 GaN 为 n 型, 通过掺 Si 可以很容易实现浓度高达  $10^{18} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  的 n 型掺杂<sup>[16]</sup>。而 p 型 GaN 一般通过掺 Mg 实现, 但由于掺 Mg 会形成 Mg-H 络合物, 导致高浓度 p 型掺杂困难, 需要热退火处理才能形成有效的 p 型掺杂, 掺杂浓度约为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[17]</sup>。有关文献在研究变温对 pn 结的特性影响时, 通常是根据  $C^{-2}$ - $V$  曲线或  $C^{-3}$ - $V$  曲线的线性关系来判断 pn 结类型, 这种判断方法在某些情况, 比如  $C^{-2}$ - $V$  曲线有线性但不明显, 或者  $C^{-2}$ - $V$  曲线和  $C^{-3}$ - $V$  曲线均具有一定的线性等情况下可能会造成偏差, 因此需要进一步的改善。

本文采用  $C$ - $V$  法研究 GaN 基 LED 的 pn 结特性, 通过液氮制冷获得变温的 pn 结  $C$ - $V$  曲线, 及相应的  $C^{-2}$ - $V$  曲线和  $C^{-3}$ - $V$  曲线, 再通过确定  $C$ - $V$  关系的幂律指数  $k$  来判断不同温度下的 pn 结

结构类型, 以及低温对 pn 结特性的影响。

## 2 实验原理

根据 pn 结电容理论的耗尽层近似, 同时认为杂质完全电离, 则 pn 结空间电荷区域的电势与电荷关系可以用泊松方程描述, 若仅考虑纵向分布, 则一维纵向分布的泊松方程为<sup>[18]</sup>:

$$\nabla^2 V(x) = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}, \quad (1)$$

其中  $\varepsilon_0$  和  $\varepsilon_r$  分别为真空介电常数和材料的相对介电常数,  $\rho(x)$  和  $V(x)$  为空间电荷区净电荷密度和电势。同时 pn 结势垒电容满足:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{l}, \quad (2)$$

其中  $l$  为 pn 结结宽,  $S$  为结截面积, 相应的杂质浓度随结宽  $l$  的分布满足:

$$N(l) = -\frac{C^3}{eS^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r} \left( \frac{dC}{dV} \right)^{-1}, \quad (3)$$

上式中  $e$  为基本电荷量,  $N = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}$  称为约化杂质浓度, 其中  $N_D$  为 n 型区施主杂质浓度,  $N_A$  为 p 型区受主杂质浓度。

一般而言, 根据杂质浓度随结宽的变化, pn 结类型基本可分为突变结、线性缓变结、非突变非线性缓变结, 其杂质浓度分布示意图分别如图 1 所示。

对于突变结, 其杂质分布特点是: 在交界面  $x = x_j$  处, n 型区施主杂质浓度  $N_D$  突变为 p 型区受主杂质浓度  $N_A$ , 如图 1(a) 所示, 且  $N_D$ 、 $N_A$  都是均匀分布。而如果杂质浓度一侧比另一侧高得很多, 则称为单边突变结, 单边突变结的结宽主要集中在低杂质浓度一侧。对于线性缓变结, 杂质浓度从 pn 结一侧到另一侧线性缓慢变化 (图 1(b))。突变结和线性缓变结的外置偏压  $V$ 、接触电势差  $V_D$  和势垒电容  $C$  分别满足<sup>[18]</sup>:

$$V_D - V = \frac{eS^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r N^*}{2} \cdot \left( \frac{1}{C} \right)^2 \text{ (突变结)}, \quad (4)$$

$$V_D - V = \frac{eS^3 (\varepsilon_0 \varepsilon_r)^2 G}{12} \cdot \left( \frac{1}{C} \right)^3 \text{ (线性缓变结)}, \quad (5)$$

其中  $N^*$  为突变结低掺杂浓度一侧的平均杂质浓度,  $G$  为线性缓变结的杂质浓度梯度。若杂质分

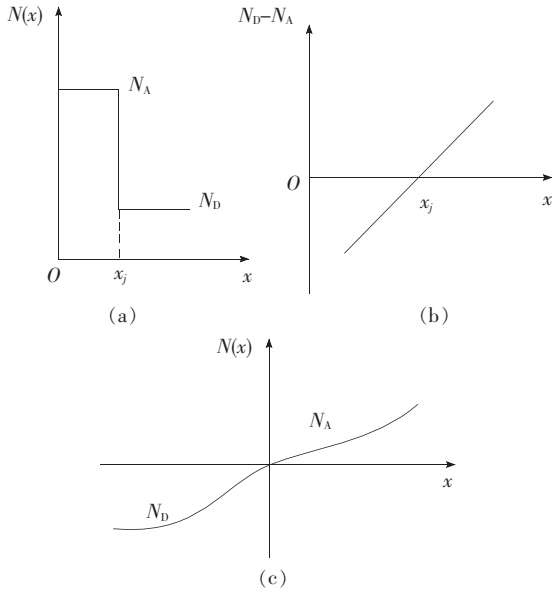


图 1 3 种 pn 结型的杂质浓度分布示意图。(a) 突变结; (b) 线性缓变结; (c) 非突变非线性缓变结。

Fig. 1 Schematic diagram of impurity concentration distribution in three types of pn junction. (a) Abrupt junction. (b) Linearly graded junction. (c) Non abrupt and non-linearly graded junction.

布既不符合突变结也不符合线性缓变结, 则为非突变又非线性缓变结, 其杂质浓度分布如图 1(c) 所示, 非突变非线性缓变结的杂质浓度分布仍可以用公式(3)表示。

公式(4)表明突变结的  $C^{-2}-V$  曲线呈线性关系(如图 2 所示)。而公式(5)则表明线性缓变结的  $C^{-3}-V$  曲线呈线性关系(图 3)。

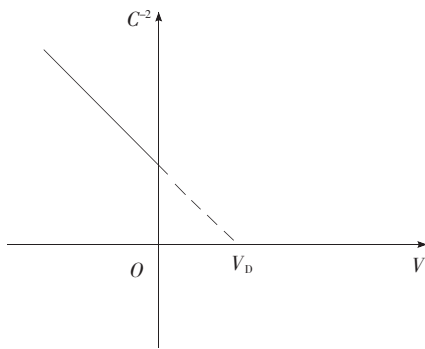


图 2 突变结的  $C^{-2}-V$  曲线关系

Fig. 2  $C^{-2}-V$  curve of abrupt junction

上述 pn 结的  $C-V$  关系仅考虑突变结和线性缓变结两种特殊情形, 一般情况下, 可以认为 pn 结的杂质浓度分布符合幂函数关系<sup>[19-20]</sup>。在该模型下, pn 结偏压  $V$  和势垒电容  $C$  存在如下幂律关系:

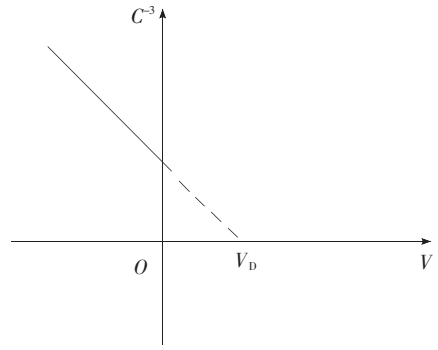


图 3 线性缓变结的  $C^{-3}-V$  曲线关系

Fig. 3  $C^{-3}-V$  curve of linearly graded junction

$$V_D - V \propto \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (6)$$

其中, 幂律指数  $k = 1/2$  对应突变结,  $k = 1/3$  对应线性缓变结, 而  $k \neq 1/2$  且  $k \neq 1/3$  时则对应非突变非缓变结。需要说明的是, 大量的精密实验测量数据表明, 即使是突变结(或线性缓变结), 指数  $k$  也不一定严格取  $1/2$ (或  $1/3$ ), 而是取一个很接近的数值。

为了判断降温过程中不同温度下的 GaN 基 LED 的 pn 结类型, 需要先确定幂律关系式(6)中的指数  $k$  值, 为此引入参数  $P_1$ , 并把公式(6)改写为:

$$V = V_D + P_1 \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (7)$$

以  $1/C$  为自变量, 对公式(7)进行微分, 得:

$$\frac{dV}{d\left(\frac{1}{C}\right)} = P_1 \cdot \frac{1}{k} \left(\frac{1}{C}\right)^{\frac{1}{k}-1}, \quad (8)$$

通过公式(8)确定  $P_1$ , 再把  $P_1$  反代入公式(7), 最后得:

$$V = V_D + k \cdot \frac{dV}{d\left(\frac{1}{C}\right)} \cdot \frac{1}{C}, \quad (9)$$

因此, 通过测量 pn 结的  $C-V$  数据, 再由  $V-C^{-1}$  曲线, 进一步计算  $\frac{dV}{d\left(\frac{1}{C}\right)}$  和  $\frac{dV}{d\left(\frac{1}{C}\right)} \cdot \frac{1}{C}$ , 接着线性拟

合  $V - \frac{dV}{d\left(\frac{1}{C}\right)} \cdot \frac{1}{C}$  曲线, 再由拟合直线的斜率确定

幂律指数  $k$ , 而拟合直线的截距为  $V_D$ 。最后, 得到被测 pn 结  $C-V$  关系的幂律通式:

$$(V - V_D)^k = \frac{A}{C}, \quad (10)$$

式(10)中  $A$  为关系系数。根据幂律指数  $k$  就可以判断不同温度下的 GaN 基发光二极管的 pn 结类型。

实验采用的样品为引脚式封装的  $\phi 5$  mm GaN 基蓝光 LED, 其中心波长为 460 ~ 465 nm, 工作电压 3 ~ 3.2 V, 结面积  $S = 6.25 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ , GaN 材料的相对介电常数  $\epsilon_r = 8.9$ , 真空介电常数  $\epsilon_0 = 8.854 \text{ pF/m}$ 。实验仪器为 CTG-1 型高频电容-电压特性测试仪, 该测试仪把电容信号转化为电压信号, 连同加在二极管两端的偏压信号, 一起输出到  $x$ - $y$  函数记录仪, 再由  $x$ - $y$  函数记录仪输出到计算机以实现实时数据采集。温度传感器为标准 Pt100  $\Omega$  温度探头。LED 样品和温度探头紧挨着置于紫铜做成的圆柱形恒温器内, 以确保温度探头能真实反映样品温度。实验时通过沉降法把 LED 样品缓慢放入液氮杜瓦瓶, 在 LED 样品温度分别为  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  (298 K),  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  (223 K),  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  (173 K),  $-150 \text{ }^\circ\text{C}$  (123 K),  $-195 \text{ }^\circ\text{C}$  (78 K) 时测量其  $C$ - $V$  曲线。另外, 为了减少 pn 结扩散电容对测量结果的影响, 实验时二极管施加偏压为负偏压, 在负偏压条件下, 反向饱和电流很小, 此时势垒电容起主要作用, 扩散电容可以忽略。在本实验中, 施加的负偏压范围为  $0 \sim -8 \text{ V}$ 。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 GaN 基 LED 的变温 $C$ - $V$ 曲线

不同温度下测得的 GaN 基蓝光 LED 样品的  $C$ - $V$  曲线如图 4 所示。图 4 表明: (1) 同一温度下, pn 结势垒电容  $C$  随着反向偏压的增大而减小, 且呈现幂函数衰减<sup>[19]</sup>; (2) 在变温情况下, 温度降低, 则势垒电容  $C$  变小, 且温度越低, 其势垒电

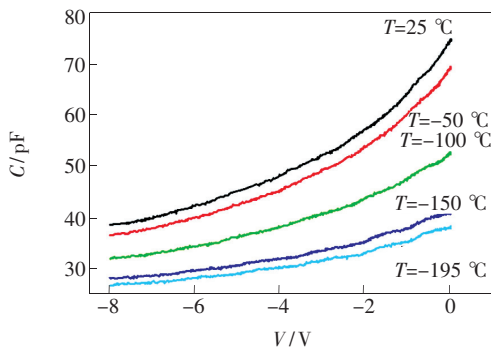


图 4 不同温度下的 GaN 基二极管 pn 结  $C$ - $V$  曲线

Fig. 4  $C$ - $V$  curves of GaN-based LED at various temperatures

容  $C$  随着反向偏压的变化就越平缓。表现为  $0 \sim -8 \text{ V}$  负偏压范围内,  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  时的  $C$ - $V$  曲线比  $T = -195 \text{ }^\circ\text{C}$  的  $C$ - $V$  曲线变化范围要大。这是因为根据半导体的低温载流子冻析效应, 当温度高于一定温度时, 杂质全部电离, 而当温度低于一定温度时, 杂质只是部分电离, 尚有部分载流子被冻析在杂质能级上。即温度高时的电离杂质浓度高于温度低时的电离杂质浓度, 所以施加同样的反向偏压时, 温度越低, 势垒电容越小。

#### 3.2 温度对 pn 结类型的影响

为了判断该 GaN 基 LED 的 pn 结类型, 以及降温对 pn 结类型的影响, 分析了  $T = 25, -50, -100, -150, -195 \text{ }^\circ\text{C}$  时的  $C^{-2}$ - $V$  曲线和  $C^{-3}$ - $V$  曲线, 结果如图 5(a) ~ (e) 所示。

图 5(a) 表明, 当  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $C^{-2}$ - $V$  曲线呈明显的线性关系, 而  $C^{-3}$ - $V$  曲线有稍微的弯曲, 不呈线性关系。进一步对  $C^{-2}$ - $V$  曲线进行最小二乘法线性回归分析, 结果说明  $C^{-2}$ - $V$  曲线的拟合直线的 Pearson 线性相关系数绝对值在 0.99 以上, 且显著性检验达到了 0.05 的显著水平。这些结果说明在  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  的室温条件下, 该发光二极管的 pn 结类型为突变结。又由于 n 型区的掺杂浓度要比 p 型区的浓度大得多, 所以该 pn 结为  $n^+p$  单边突变结; 同样, 比较图 5(b) 中  $T = -50 \text{ }^\circ\text{C}$  时的  $C^{-2}$ - $V$  曲线和  $C^{-3}$ - $V$  曲线的线性程度, 亦表明  $C^{-2}$ - $V$  曲线具有明显的线性关系, 这说明该温度下的 pn 结类型仍为单边突变结; 进一步降低温度至  $T = -100 \text{ }^\circ\text{C}$  时发现 (图 5(c)), 虽然此时的  $C^{-2}$ - $V$  曲线仍然保持线性关系, 但线性回归分析表明  $C^{-3}$ - $V$  曲线也呈现一定的线性关系, 因此在该温度下单凭  $C^{-2}$ - $V$  曲线的线性关系来判断该 pn 结的结类型会出现偏差。此外, 该现象亦说明了当温度降低到  $T = -100 \text{ }^\circ\text{C}$  时 pn 结的类型开始出现变化; 继续降低温度至  $T = -150 \text{ }^\circ\text{C}$  (图 5(d)), 虽然相对  $C^{-3}$ - $V$  曲线,  $C^{-2}$ - $V$  曲线出现了稍微的弯曲, 但是线性回归分析表明  $C^{-2}$ - $V$  曲线和  $C^{-3}$ - $V$  曲线均呈现线性关系。这些结果一方面说明了在该温度下由  $C^{-3}$ - $V$  曲线和  $C^{-2}$ - $V$  曲线判断 pn 结类型出现困难; 另一方面又说明了该温度下的 pn 结类型已经不再是突变结, 但难以由  $C^{-3}$ - $V$  曲线的线性关系来判断其是缓变结还是非突变非缓变结。当温度最终降低至接近液氮温度



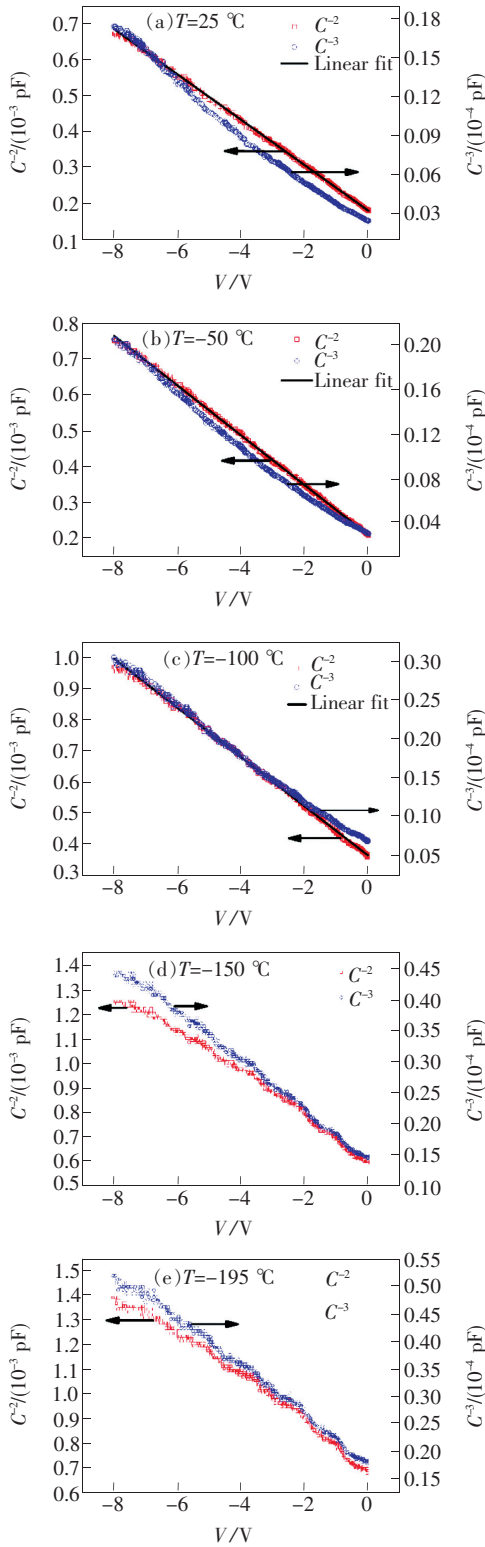


图 5 不同温度下 pn 结的  $C^{-2}$ - $V$  曲线和  $C^{-3}$ - $V$  曲线。  
 (a)  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $T = -50\text{ }^\circ\text{C}$ ; (c)  $T = -100\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 (d)  $T = -150\text{ }^\circ\text{C}$ ; (e)  $T = -195\text{ }^\circ\text{C}$ 。

Fig. 5  $C^{-2}$ - $V$  and  $C^{-3}$ - $V$  curves at various temperatures.  
 (a)  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$ . (b)  $T = -50\text{ }^\circ\text{C}$ . (c)  $T = -100\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 (d)  $T = -150\text{ }^\circ\text{C}$ . (e)  $T = -195\text{ }^\circ\text{C}$ .

的  $T = -195\text{ }^\circ\text{C}$  时(图 5(e)), 同样很难根据  $C^{-2}$ - $V$  曲线或  $C^{-3}$ - $V$  曲线的线性关系来判断该 pn 结的结类型。

上述不同温度下  $C^{-2}$ - $V$  曲线和  $C^{-3}$ - $V$  曲线的分析结果表明:(1) 在  $T = 25 \sim -50\text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围内, GaN 基 LED 的 pn 结类型明显为单边突变结,  $C^{-2}$ - $V$  曲线线性明显;(2) 当温度降低至  $T = -100\text{ }^\circ\text{C}$  时, pn 结类型开始发生变化, 但难以由  $C^{-2}$ - $V$  曲线或  $C^{-3}$ - $V$  曲线的线性关系来判断该温度下的 pn 结类型;(3) 当温度继续降低至  $T = -150 \sim -195\text{ }^\circ\text{C}$  时, 该 pn 结不再是突变结, 但同样很难根据  $C^{-2}$ - $V$  曲线或  $C^{-3}$ - $V$  曲线的线性或非线性关系来判断该 pn 结类型是缓变结还是非突变非缓变结。

为了确定不同温度下的 pn 结类型, 以及温度对 pn 结的影响, 进一步根据幂律公式(9), 由  $V \cdot \frac{dV}{d\left(\frac{1}{C}\right)} \cdot \frac{1}{C}$  曲线拟合直线的斜率确定幂律指数  $k$ , 再由  $k$  判断 pn 结类型。不同温度下 pn 结的  $V \cdot \frac{dV}{d\left(\frac{1}{C}\right)} \cdot \frac{1}{C}$  曲线如图(6)所示, 同时分别根据斜率和截距计算得到的幂律指数  $k$  和 pn 结接触电势差  $V_D$  如表 1 所示。表 1 中的平均杂质浓度  $N^*$  是根据公式(4), 由  $C^{-2}$ - $V$  曲线的斜率计算得到。

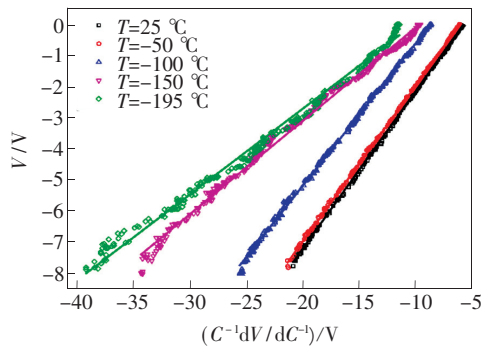


图 6 不同温度下 GaN 基 pn 结的  $V$ - $(C^{-1} dV/dC^{-1})$  曲线

Fig. 6  $V$ - $(C^{-1} dV/dC^{-1})$  curves of pn junction at various temperatures

图(6)和表 1 的结果表明: 在  $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$  和  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  时,  $C$ - $V$  呈现幂律指数为  $1/2$  的幂律关系, 说明在这两个温度下的 pn 结为严格的单边突变结, 这一结果与根据图 5(a) 及图 5(b) 得到的结果相一致。当温度降至  $T = -100\text{ }^\circ\text{C}$  时, 虽然

图 5(c) 表明此时的  $C^{-2}-V$  曲线有一定的线性关系, 但幂律指数  $k$  不是 0.5, 而是 0.45, 说明 pn 结类型近似单边突变结, 但不是严格的单边突变结, 这表明该温度下的 pn 结类型开始发生变化。当温度继续降低至  $T = -150\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $T = -195\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 幂律指数  $k$  分别为 0.30 和 0.28, 说明 pn 结的结构类型发生了明显的改变, 不再是突变结, 而是介于突变结和缓变结之间的非突变非缓变结。

表 1 不同温度下的 pn 结幂律指数  $k$ 、接触电势差  $V_D$  和平均杂质浓度  $N^*$

Tab. 1 Power-law index  $k$ , barrier height  $V_D$  and  $N^*$  at various temperatures

$T/^{\circ}\text{C}$	$k$	$V_D/V$	$N^*/(10^{17}\text{ cm}^{-3})$
25	0.51	2.95	6.44
-50	0.50	3.03	5.91
-100	0.45	3.98	5.15
-150	0.30	2.90	4.63
-195	0.28	2.81	4.45

造成上述结果的原因可能是:

(1) 由于半导体的低温载流子冻析效应, 当温度降低时, 电离杂质的浓度会随着降低, 由于变温霍尔效应表明 GaN 的杂质饱和电离区在 150 K ( $T = -123\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 左右<sup>[16,21]</sup>, 所以当温度  $T$  为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 杂质完全电离, 温度对电离杂质的浓度没有影响, 从而也不会影响 pn 结的结类型。当温度降低至  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 由于该温度接近饱和和电离温度, 会有杂质部分电离现象发生, 导致 pn 结类型开始发生变化, 从严格的突变结变为近似的突变结。而当温度继续降低至  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 杂质电离与温度有关。温度越低, 电离的杂质浓度越少, 并导致 pn 结的空间电荷分布受到影响。

(2) 另一个主要原因是 GaN 中的缺陷, 如位错等会产生悬挂键, 形成受主或施主中心, 并在位错线附近形成局域的空间电荷<sup>[22-23]</sup>。当温度高于

杂质饱和和电离区温度时, 晶格振动对载流子的散射起主要作用, 而当温度降低至低于杂质饱和和电离区温度时, 缺陷的影响将凸显, 与位错有关的局域空间电荷区加强, 使得原有的 pn 结空间电荷分布被破坏, 导致 pn 结类型发生了改变。

(3) 另外, pn 结附近的界面态也是一个因素<sup>[10-11,24]</sup>。界面态来自位错线延伸到 pn 结界面而形成的界面态, 以及降温过程中材料热胀系数失配产生的界面态。这些界面态同样会在 pn 结界面附近形成局域空间电荷区。当温度降得很低时(如低于 150 K), 会有更多的电子(空穴)被界面态捕获, 界面附近的局域空间电荷区加强, 从而破坏了原有的空间电荷分布, 导致 pn 结类型发生了改变。

## 4 结 论

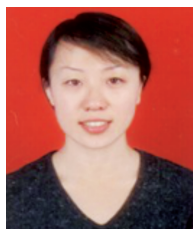
电容-电压法是一种常用、有效的 pn 结特性诊断方法, 但是简单地根据  $C^{-2}-V$  曲线或  $C^{-3}-V$  曲线来判断 pn 结类型可能会造成偏差。本论文根据  $C^{-2}-V$  曲线和  $C^{-3}-V$  曲线, 并进一步结合  $C-V$  幂律指数  $k$  来判断不同温度条件下 GaN 基发光二极管 pn 结的结构类型, 并分析温度对 pn 结的影响。实验结果表明: 在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,  $C^{-2}-V$  曲线呈现明显的线性, 同时幂律指数  $k$  为  $1/2$ , 说明该温度范围内的 pn 结为严格的突变结。当温度降低至  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 虽然  $C^{-2}-V$  曲线保持一定的线性关系, 但是  $k$  为 0.45, 这说明 pn 结类型开始发生变化。当温度继续降低至  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 根据  $C^{-2}-V$  曲线或  $C^{-3}-V$  曲线来判断 pn 结类型变得困难, 但此时幂律指数  $k$  分别为 0.30 和 0.28, 是非突变非缓变结, 这说明该温区内的 pn 结类型已经发生了变化。造成 pn 结结构随温度变化的原因是低温载流子冻析效应, 以及晶体的缺陷和界面态形成的局域空间电荷在低温的环境下影响了 pn 结原来的空间电荷分布, 并改变了 pn 结类型。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 符斯列, 王春安, 蒋联娇, 等.  $C-V$  法测量 GaN 基蓝光 LED 的 pn 结特性 [J]. 物理实验, 2017, 37(5):1-6.  
FU S L, WANG C A, JIANG L J, *et al.*. Measuring characteristics of PN junction in GaN-based LED using  $C-V$  method [J]. *Phys. Experiment.*, 2017, 37(5):1-6. (in Chinese)
- [ 2 ] FU S L, CHEN J F, ZHANG H B, *et al.*. Characterizations of GaN film growth by ECR plasma chemical vapor deposition

- [J]. *J. Cryst. Growth*, 2009, 311:3325-3331.
- [3] 李杨, 冯列峰, 李丁, 等. 半导体 GaN 基蓝光发光二极管的精确电学特性 [J]. *光电子·激光*, 2013, 24(4):663-668.
- LI Y, FENG L F, LI D, *et al.*. Accurate electrical properties of semiconductor GaN blue light emitting diodes at large forward bias voltage [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2013, 24(4):663-668. (in Chinese)
- [4] 吴先球, 熊予莹. 近代物理实验教程 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2009:210.
- WU X Q, XIONG Y Y. *Modern Physics Experiment Course* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2009:210. (in Chinese)
- [5] 何波, 史衍丽, 徐静. C-V 法测量 pn 结杂质浓度分布的基本原理及应用 [J]. *红外*, 2006, 27(10):5-10.
- HE B, SHI Y L, XU J. Principle of the C-V method for measuring impurity distribution in junction diodes and its application [J]. *Infrared*, 2006, 27(10):5-10. (in Chinese)
- [6] 舒斌, 戴显英, 张鹤鸣. pn 结电容-电压法测量应变 SiGe 禁带宽度 [J]. *物理学报*, 2004, 53(1):235-238.
- SHU B, DAI X Y, ZHANG H M. Determination of bandgap in SiGe strained layers using a pn heterojunction C-V [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2004, 53(1):235-238. (in Chinese)
- [7] LAURENT M A, GUPTA G, SUNTRUP III D J, *et al.*. Barrier height inhomogeneity and its impact on (Al, In, Ga)N Schottky diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2016, 119:064501.
- [8] AREHART A R, ALLERMAN A A, RINGEL S A. Electrical characterization of n-type  $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{N}$  Schottky diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, 109:114506.
- [9] MOHAMMAD S N. Contact mechanisms and design principles for alloyed ohmic contacts to n-GaN [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 95(12):7940-7953.
- [10] MOHAMMAD S N. Contact mechanisms and design principles for Schottky contacts to group-III nitrides [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 97:063703.
- [11] NEZIR Y, KADIR E, ABDULMECIT T. On temperature-dependent experimental I-V and C-V data of Ni/n-GaN Schottky contacts [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 108:114506.
- [12] MICZEK M, MIZUE C, HASHIZUME T, *et al.*. Effects of interface states and temperature on the C-V behavior of metal/insulator/AlGaIn/GaN heterostructure capacitors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, 103:104510.
- [13] 沈波, 李卫平, 周玉刚, 等.  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.55}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  异质结构的电容-电压特征 [J]. *发光学报*, 2001, 22(z1):57-60.
- SHEN B, LI W P, ZHOU Y G, *et al.*. Capacitance-voltage properties of a  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$  ferroelectric film on  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructure [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2001, 22(z1):57-60. (in Chinese)
- [14] 招瑜, 魏爱香, 刘俊. 利用温变电容特性测量发光二极管结温的研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(11):118501.
- ZHAO Y, WEI A X, LIU J. Junction temperature measurement of light-emitting diodes using temperature-dependent capacitance [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2015, 64(11):118501. (in Chinese)
- [15] 段猛, 郝跃. GaN 基蓝色 LED 的研究进展 [J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 30(1):60-65.
- DUAN M, HAO Y. The state of arts for GaN-based blue-light-emitting diodes [J]. *J. Xi'an Electron. Sci. Univ.*, 2003, 30(1):60-65. (in Chinese)
- [16] 张曾, 张荣, 谢自力, 等. n 型 GaN 薄膜输运性质与发光研究 [J]. *中国科学 G 辑*, 2008, 38(9):1221-1227.
- ZHANG Z, ZHANG R, XIE Z L, *et al.*. Transport and luminescence properties of n-type GaN film [J]. *Sci. Sinica Phys. G*, 2008, 38(9):1221-1227. (in Chinese)
- [17] 谢世勇, 郑有焯, 陈鹏, 等. GaN 材料 p 型掺杂 [J]. *固体电子学研究与进展*, 2001, 21(2):204-210.
- XIE S Y, ZHENG Y D, CHEN P, *et al.*. p-type doping of GaN [J]. *Res. Prog. SSE*, 2001, 21(2):204-210. (in Chinese)
- [18] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学 [M]. 第 1 版. 北京: 电子工业出版社, 2008, 195:212.
- LIU E K, ZHU B S, LUO J S. *Semiconductor Physics* [M]. 1st ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2008, 195:212. (in Chinese)
- [19] 李潮锐, 唐强, 刘小伟. 二极管非超突变结 C-V 幂律分析 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2009, 48(4):20-23.
- LI C R, TANG Q, LIU X W. Power-law for analysis of impurity distribution in non-hyperabrupt junction [J]. *J. Zhongshan Univ.*, 2009, 48(4):20-23. (in Chinese)

- [20] NEAMEN D A. *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles* [M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2012:265.
- [21] MAVROIDIS C, HARRISM J J, KAPPERS J, *et al.*. Detailed interpretation of electron transport in n-GaN [J]. *J. Appl. Phys.* 2003, 93(11):9095-9103.
- [22] 何菊生, 张萌, 潘华清, 等. 一种测量纤锌矿 n-GaN 位错密度的新方法 [J]. *物理学报*, 2016, 65(16):167201.  
HE J S, ZHANG M, PAN H Q, *et al.*. A new method to determine the dislocation density in wurtzite n-GaN [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2016, 65(16):167201. (in Chinese)
- [23] 甄慧慧, 鲁麟, 刘子超, 等. 位错形态与 GaN 外延薄膜电阻率之间的关系 [J]. *发光学报*, 2013, 34(12):1607-1612.  
ZHEN H H, LU L, LIU Z C, *et al.*. Correlation between the morphology of threading dislocations and the origin of high-resistivity GaN [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(12):1607-1612. (in Chinese)
- [24] ROCCAFORTE F, GIANNAZZO F, IUCOLANO F, *et al.*. Electrical behavior of AlGaIn/GaN heterostructures upon high-temperature selective oxidation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, 106:023703.



王春安(1982 -),女,内蒙古牙克石人,博士研究生,讲师,2007年于内蒙古师范大学获得硕士学位,主要从事 III-V 族半导体材料及光电子器件的研究。

E-mail: chunan.wang@coer-scnu.org



符斯列(1972 -),男,海南临高人,博士,副教授,2007年于华南师范大学获得博士学位,主要从事低温等离子体技术制备光电薄膜材料的研究。

E-mail: fusl@scnu.edu.cn